现状与展望

功率半导体的现状与展望

Power Semiconductors: Current Status and Future Outlook

大西 泰彦 ONISHI, Tatsuhiko　宫坂 忠志 MIYASAKA, Tadashi　井川 修 IKAWA, Osamu

1 引言

富士电机以在能源与环境事业中为实现可持续发展社会做出贡献为经营方针的支柱，在包括供应链在内的整个企业活动中推进 SDGs，致力于解决以全球气候变暖为首的社会与环境课题。通过这些举措，响应国际社会追求的经济与社会环境的综合提高，为实现安全安心、可持续发展的社会做出了贡献。

为了富士电机所致力的环境课题之一“实现低碳社会”，必须提高在工业领域和社会基础设施等各种系统中所用的电力电子设备的效率。因此，提高驱动这些设备的功率半导体器件的性能非常重要。

2 富士电机的功率半导体

如**图 1** 所示，富士电机可根据使用用途提供各种功率半导体器件。

在小容量设备领域，开发并提供了空调等家电产品电机驱动系统小容量 IPM(*1)(Intelligent Power Module)、功率调节器 (PCS : Power Conditioning System) 和不间断电源装置 (UPS : Uninterruptible Power System) 等电力转换用产业用分立器件(*2) IGBT(*3)(Insulated Gate Bipolar Transistor)，以及其他各种设备的电力转换用超结 (SJ) -MOSFET(*4) (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)。SJ-MOSFET 方面，除了产业用途之外，还开发并提供了汽车发动机、传动装置、制动器等控制部件和 xEV (电动化车辆) 用充电器的电力转换和控制用产品。并且，在车载用途方面，开发并提供了发动机和传动装置等动力传动的液压阀等的驱动电流导通 - 关断控制用 IPS (Intelligent Power Switch)、汽油车进气系统与排气系统的气压控制部、发动机、传动装置、动力转向系统、制动器的液压控制单元等用压力传感器、汽油发动机点火控制用单芯片点火器。另外，还开发并提供了控制 LED 照明等各种电子设备开关电源的功率 IC。

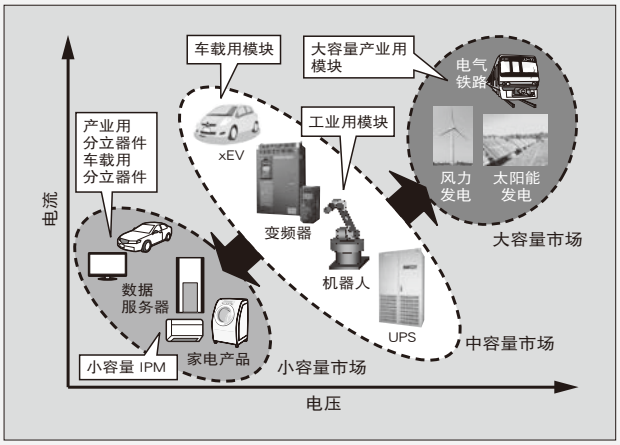

图 1　富士电机的功率半导体产品的应用示例

在中容量设备领域，开发并提供了用于通用变频器、机床与机器人的伺服电机控制、商用空调的电机控制、UPS 的电力转换等的产业用 IGBT 模块。为消除劳动力不足，提高生产率，预计产业用功率半导体在自动化设备和系统中的需求将扩大。在车载用途方面，开发并提供了用于 xEV 的电机控制的 IGBT 模块。世界各国开始从汽油车向 xEV 转换，预计今后车载用功率半导体的需求也会扩大。

在大容量设备领域，开发并提供了风力发电和百万瓦级太阳能发电等可再生能源的电力转换、铁路车辆电机的可变速驱动中所用的 IGBT 模块等，为实现零排放做出了贡献。此外，开发并提供了与现有硅 (Si) 器件相比具有

(*1) IPM

Intelligent Power Module 的简称。是一种除功率半导体器件之外，还内置了驱动电路，保护电路的功率模块。除了能够减轻电路设计的负担，通过采用专属的驱动电路还能够最大限度地发挥功率半导体器件的性能。

(*2) 分立器件

由被称为 1in1 电路所组成的功率半导体器件。该电路由 1 个 IGBT 或 MOSFET，以及与其构成反向并联的二极管所组成。形状采用了通用的引脚布局，有 TO-220 及 TO-3P 等。被用于小容量型的 PC 电源、不间断电源装置、液晶显示器及小型电机的控制电路等。

(*3) IGBT

Insulated Gate Bipolar Transistor 的简称。栅极部和 MOSFET 的结构相同，是具有用绝缘氧化膜绝缘的栅极电压控制型器件。是一种兼有 MOSFET 和双极晶体管优点的器件。由于是双极运行因而能进行传导率调制，所以兼顾了应用于变频器时所需的足够的开关速度、高耐压性和低导通电阻。

(*4) SJ-MOSFET

在元件的相对面形成漏电极、源电极的纵向功率 MOSFET 中，以前是在低浓度的 n 层形成漂移层。与此相对，将漂移层设计成周期性 pn 柱结构的是超结 (SJ) -MOSFET。与传统的 MOSFET 相比，SJ-MOSFET 可大幅改善元件的耐压和导通电阻的均衡特性。

低损耗、高耐压、高温工作等卓越特点的下一代功率半导体——碳化硅（SiC）[*5]功率半导体器件。

3 功率半导体的开发状况

本文对富士电机在功率半导体开发方面的最新成果进行了简单总结。

3.1 xEV 用 IGBT 模块过电流耐量的提高

xEV 用 IGBT 模块是实现车辆小型化、高效化和高可靠性的关键器件。xEV 用 IGBT 功率模块的课题之一是过电流耐量（I^2t 耐量）的改善。此次，采用 RC-IGBT[*6]（逆导通 IGBT），用引线框架（LF）方式[1]取代传统的引线焊接（引线）式连接 RC-IGBT 表面电极的电路，开发出了可提高 I^2t 耐量的 xEV 用 IGBT 模块（**图 2**）。

在 RC-IGBT 中，IGBT 区域和 FWD[*7]（Free Wheeling Diode）区域整合于单芯片上，因在包括 IGBT 区域在内的整个区域均可散热，FWD 通电时来自 FWD 的发热比传统的 FWD 热阻低，提高了 I^2t 耐量[2]。

另外，I^2t 耐量还取决于散热条件。因此，通过 LF 方式增加芯片表面与电路的接合面积，提高了 I^2t 耐量。与采用引线方式的个别 FWD 和 IGBT 构成的 IGBT 模块（传统产品）相比，采用 LF 方式的 RC-IGBT 模块（新开发产品）的 I^2t 耐量提高至 2.6 倍，实现了高可靠性的 xEV 用 IGBT 模块。（参照 11 页，“xEV 用 IGBT 模块过电流耐量的提高”）。

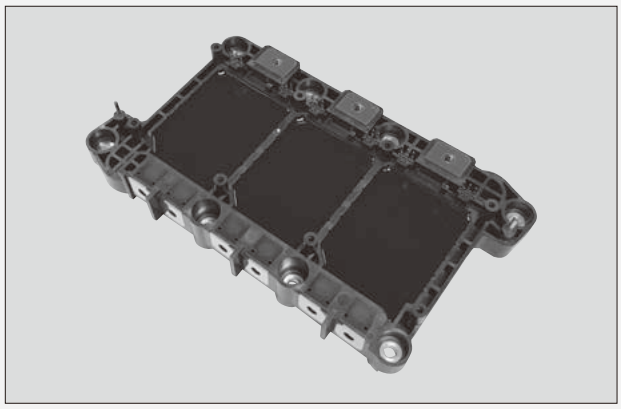

图 2 xEV 用模块（新开发产品）

3.2 xEV 用功率半导体模块的直接水冷技术

这些用于 xEV 电机控制的变频器单元被安装在有限的空间内，因而要求小型化和安装方法的高度自由化，为了实现低油耗，还对轻量化和提高效率也提出了要求。为满足这些要求，近来的电动化系统以大幅提高效率和低成本为目标，除电机和变频器外，整合变速箱的新型机电一体化系统的开发也活跃起来。富士电机在功率模块方面也开发并提供实现了最适合该新系统的小型化与薄型化及高可靠性化，采用轻量且加工性卓越的铝制冷却器的直接水冷功率模块[3],[4]。

第 1 代直接水冷结构中，冷却器的散热片基底占整个热阻的 36%，阻碍了散热性能，热分析仿真清楚地证实了这个问题。如果将散热片基底厚度减薄至 20%，则其热阻会降低，整个模块的热阻可得到改善。另一方面，为了抑制模块温度变化引起的热变形，并使冷却器具有刚性，散热片基底需要一定程度的厚度。为了兼顾这两个问题，开发了将散热器和水冷套一体化的水冷套一体型散热片结构。与未进行一体化的传统开放式散热片结构相比，该结构可轻易地抑制冷却器变形。**图 3** 所示为冷却器的翘曲与散热片基底厚度的依赖关系。与传统的开放式散热片结构相比，水冷套一体型散热片结构即使减薄至 20%，也可将翘曲降低至约 150 μm 以下。在确保刚性的同时，降低了散热片基底的热阻。

另外，在冷却器的翘曲同等的情况下，水冷套一体型散热片结构与开放式散热片结构相比，具有 2 倍以上的温度循环耐量，可靠性得到提高。（参照 14 页，“xEV 用

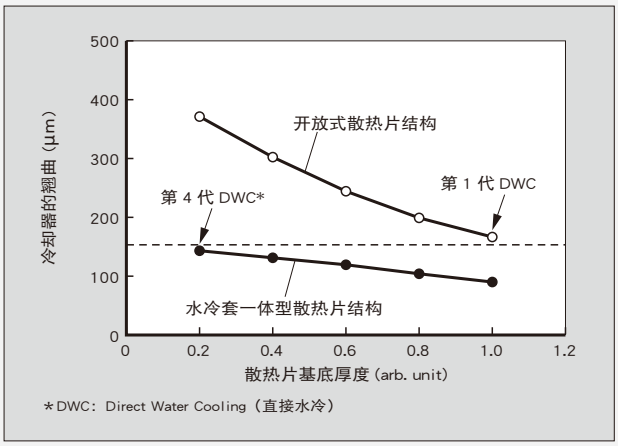

图 3 基于要素模型的冷却器翘曲与散热片基底厚度的依赖关系

（*5）SiC

硅（Si）和碳（C）的化合物。存在 3C，4H，6H 等多种结晶结构的多种形态，根据不同的结构，具有 2.2 ～ 3.3 eV 的带隙，作为一种宽禁带半导体被人们所熟知。由于具备高绝缘损坏电压和高热传导率等对功率器件而言有利的物性，因此作为一种可实现高耐压、低损耗、高温运行的器件，其实用化在不断发展。

（*6）RC-IGBT

Reverse-Conducting（逆导通）IGBT 的简称。在模块中将成对使用的 IGBT 和 FWD 整合在一颗芯片中的元件。由于是 IGBT 部和 FWD 部交替运行，因此散热性优异，可减少模块内的芯片数目，因此有助于实现 IGBT 模块的小型化及提升功率密度。

（*7）FWD

Free Wheeling Diode 的简称。也叫回流二极管。在变频器等的电力转换电路中与 IGBT 并联，充当 IGBT 关断时将积累在电感器中的能量回流到电源侧的角色。主要用作 Si-FWD 的 PiN 二极管是少数载流子也使用的双极型，因此电流沿正向流通时的电压下降可保持在较小范围，但相应地，反向恢复损耗变大。

功率半导体模块的直接水冷技术”）。

3.3 车载用第 5 代 IPS “F5202H”

IPS 是将用作输出级的纵向功率 MOSFET 和构成控制与保护电路的横向功率 MOSFET 集成在一个芯片上的产品。这次，富士电机开发了有助于电子控制系统的小型化与高散热化的带 AMP 的 IPS “F5202H”。通过采用第 5 代 IPS 器件与工艺技术，在保持基本性能的同时，芯片尺寸比传统产品减少了 45%。其结果，新产品不仅可搭载于小型、散热性卓越的 SON（Small Outline Non-leaded）封装，封装面积也削减了 45%，热阻降低了 80%。

图 4 所示为 F5202H 与传统产品[(5)]的外观和内部结构的比较。新产品具有以下特点，有助于电子控制系统的小型化。

(a) 在维持基本性能的同时，实现了控制与保护电路的小型化

(b) 采用了小巧且具有高散热性的 SON 封装

(c) 内置高精度运算放大器，可监控高精度的负载电流

(d) 接合部温度 T_{vj} 最大额定值为 175 ℃，在高温环境下可进行长时间工作

（参照 19 页，“车载用第 5 代 IPS ‘F5202H’ ”）

3.4 第 7 代 “X 系列” 产业用 1200 V/2400 A RC-IGBT 模块

富士电机进行芯片和封装的技术革新，实现了第 7 代 “X 系列” IGBT 模块的产品化，并凭借 IGBT 模块的低损耗化・高可靠性化，实现了高功率密度化[(6)]。此外，开发出了一种使 IGBT 和 FWD 单芯片化的 RC-IGBT[(7),(8)]，在损耗降低的同时可减少芯片数量和总芯片面积。第 7 代 “X 系列” 产业用 RC-IGBT（“X 系列” RC-IGBT）模块将第 7X 系列 IGBT 模块的芯片技术、封装技术与 RC-IGBT 技术进行结合，实现了更高的功率密度。此次，开发了搭载 RC-IGBT 的 1200 V/2400 A 额定 PrimePACK™[〈注〉] 3+，并将其加入到产品系列之中。

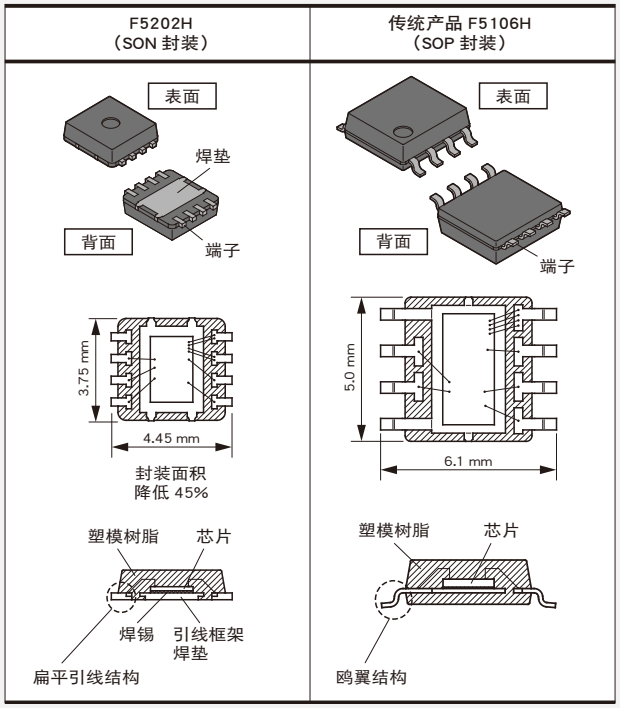

图 4 封装的外观与内部结构的比较

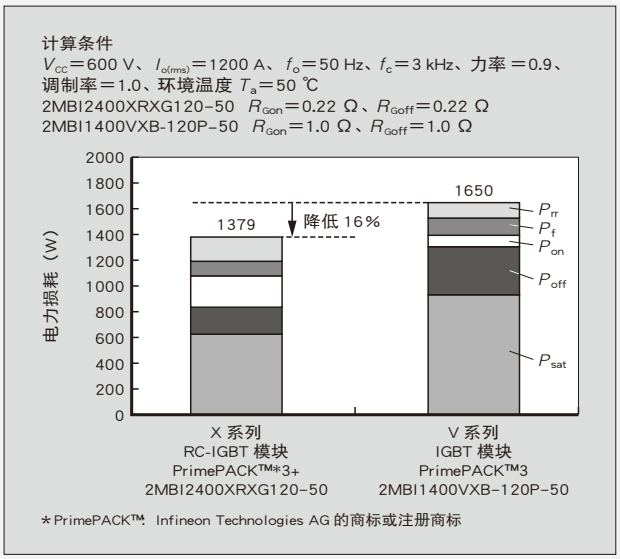

图 5 “X 系列”、“V 系列” 损耗的比较

通过 X 系列的芯片技术，大幅降低了集电极和发射极饱和电压 $V_{CE(sat)}$。另外，通过应用最先进的薄晶圆加工技术，改善了饱和电压与开关损耗的权衡关系。通过这些举措，电力损耗比传统产品降低了 16%（**图 5**）。

此外，“X 系列” RC-IGBT 模块采用了 RC-IGBT 技术、高散热绝缘基板，大幅降低了热阻，在相同的封装尺寸下实现了比传统产品更高的额定电流。而且，通过采用高耐热硅胶，将连续工作时的最大接合温度提高至 175 ℃，同时还确保了高可靠性（参照 24 页，“第 7 代 “X 系列” 产业用 1200 V/2400 A RC-IGBT 模块”）。

3.5 第 2 代 1200 V All-SiC 模块的产品系列扩大

使用了 Si 的功率半导体器件的特性已经接近其材料物性的理论极限。因此，SiC 作为可超越 Si 的特性极限，能满足小型化和高效率化要求的下一代半导体材料备受瞩目。

2017 年，富士电机向市场推出了 All-SiC 2 in 1 模块[(9)]，该模块将采用沟槽型栅结构的第 1 代 SiC-MOSFET 芯片搭载在全模封装中，额定容量为 1200 V/400 A。

而且，为了扩展产品系列，使用 Si-IGBT 模块的标准封装（W108×D62（mm）），开发了确保外形和端子配置兼容性的 All-SiC 2 in 1 模块。此次的 ALL-SiC 模块的主端子部分采用层压结构，降低了内部电感。

图 6 所示为 1200 V 耐压的第 2 代 SiC 沟槽型栅 MOSFET 与第 1 代 SiC 沟槽 MOSFET 的标准化导通电

〈注〉PrimePACK ™：Infineon Technologies AG 的商标或注册商标

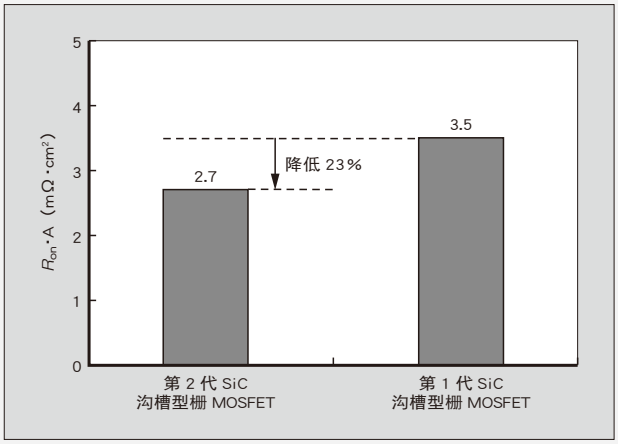

图 6　第 2 代 SiC 沟槽型栅 MOSFET 与第 1 代 SiC 沟槽型栅 MOSFET 的 R_{on} · A 比较

阻 R_{on}·A 的比较。元胞间距微细化的第 2 代 SiC 沟槽型栅 MOSFET 与第 1 代相比，R_{on} · A 降低了 23%，降低了导通损耗。

仿真结果表明，此次开发的 All-SiC 模块在输出电流 $I_{O(rms)}$=200 A 的条件下，与 Si-IGBT 模块相比，载波频率 f_c=5 kHz 时降低 59%，f_c=20 kHz 时也降低 63% 的变频器功率损耗。因此，如果采用搭载第 2 代 SiC 沟槽型栅 MOSFET 的 All-SiC 模块，则损耗变小，可实现高密度化和大容量化。另外，通过开关的高频化，可使用小型的无源器件，电力电子设备可实现小型化（参照 29 页，“第 2 代 1200 V All-SiC 模块的产品系列扩大”）。

3. 6　采用小型封装 “P644” 的第 7 代 “X 系列” IGBT-IPM

IPM 是在由 IGBT 和 FWD 构成的 IGBT 模块中内置了 IGBT 栅极驱动电路和保护电路的高性能 IGBT 模块。

为满足电力转换装置进一步小型化、高效率化和高输出化的要求，在应用第 7 代芯片技术和封装技术的 “X 系列” IPM[10] 系列中，作为内置制动电路的 IPM，使用了**图 7** 所示的行业最小级别的 “P644” 封装。

X 系列 IPM P644 的产品系列中，额定电压 650 V 系有 50 A 和 75 A，额定电压 1200 V 系有 25 A 和 35 A，与同一额定范围的传统 “V 系列” IPM 的 7 in 1 用封装 “P636” 相比，冷却器上的模块设置面积缩小了 12%。

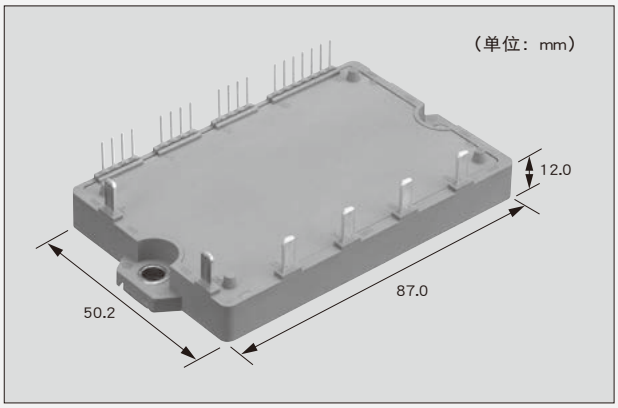

图 7　“X 系列” IPM “P644” 的产品外观

通过表面沟槽型栅结构的微细化和薄晶片加工技术使漂移层变薄，通过改善了 IGBT 的关断损耗和导通损耗的均衡特性的第 7 代芯片技术[11] 及降低开关时的开通损耗的栅极驱动电路的改善，与传统的 V 系列 IPM 相比，大幅降低了功率损耗。此外，为了实现高温工作，采用了高耐热凝胶和高可靠性焊锡等，将连续工作时的芯片接合温度 T_{vjop} 的最高温度从 V 系列 IPM 的 125 ℃扩大到了 150 ℃。另外，在下桥臂保护动作时，制动单元 IGBT 可独立动作，可防止半导体元件的过电压破坏。通过这些新技术，X 系列 IPM P644 与 V 系列 IPM 相比，除了外形小型化外，还可以实现更高的输出功率（参照 34 页，“采用小型封装 “P644” 的第 7 代 “X 系列” IGBT-IPM”）。

3. 7　分立器件 IGBT “XS 系列” 的产品系列扩大

现在，对服务器和数据中心用 UPS 及可再生能源用 PCS 的高效化需求不断增加。富士电机量产并供应可改善导通损耗与开关损耗的均衡特性、提高 UPS 和 PCS 效率的 650 V 和 1200 V 耐压的分立器件 IGBT “XS 系列”[12]。

新开发了 XS 系列 1200 V/75 A 的 TO-247-4 封装产品，添加到了产品系列中。

该系列 IGBT 芯片以第 7 代 X 系列 IGBT 为基础，针对 UPS 和 PCS，在优化表面结构和 FS 层的同时，与第 6 代相比，改善了导通损耗 $V_{CE(sat)}$- 关断损耗 E_{off} 的权衡特性[13]，如抑制空穴注入的集电极优化和 Si 晶片的薄化等。

产品采用的是在传统的 TO-247 封装中追加了辅助发射极端子的 TO-247-4 封装。通过添加辅助发射极端子来分离栅极电流和集电极电流 I_C，可降低开通或关断时施加给栅极电压的集电极电流和发射极配线电感引起的反电动势，可减少开关损耗。

图 8 所示为额定值为 1200 V/75 A 的 TO-247-4

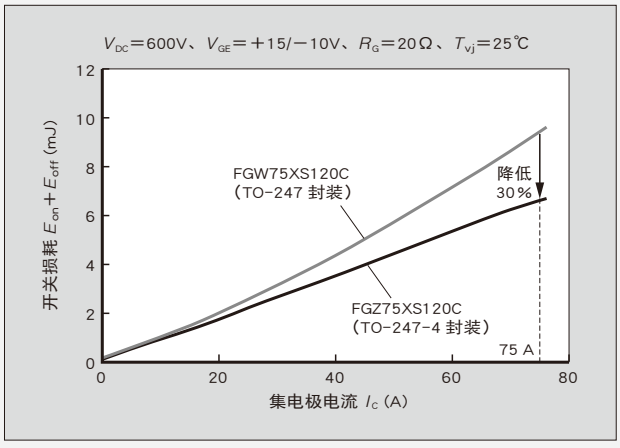

图 8　TO-247-4 封装产品与 TO-247 封装产品的开关损耗比较（I_C 依赖关系）

封装产品和 TO-247 封装产品的开关损耗的 I_C 依赖关系。与 TO-247 封装相比，添加了辅助发射极的 TO-247-4 封装的开关损耗（开通损耗 E_{on} + 关断损耗 E_{off}）在额定电流为 75 A 时降低了 30%（参照 39 页，“分立器件 IGBT “XS 系列” 的产品系列扩大”）。

3.8 第 4 代临界模式 PFC 控制 IC “FA1B00N”

随着电子设备的小型化、轻量化，开关电源的使用得到了广泛普及。开关电源中的高次谐波电流会造成设备或配线电设备的运行故障或功率因数低下，表观功率增加。为了解决该电源高次谐波电流及功率因数的问题，广泛使用了有源滤波方式的功率因数改善（PFC：Power Factor Correction）电路，富士电机对控制该 PFC 电路的 IC 进行了产品化。

电气设备整体的节能化显得尤为重要，在 PFC 电路中也要求削减待机电力、提高包括轻负载在内的广泛负载区域的效率。

此外，近年来，因为消费者对 LED 照明等电子设备的长寿命化的期待和低价格化的要求，在 PFC 电路中也要求同时实现高可靠性、削减电源成本。

为满足这些要求，富士电机开发了第 4 代临界模式 PFC 控制 IC “FA1B00N”，与满足高次谐波电流限制，主要用于 LED 照明产品的临界模式 PFC 控制 IC “FA5601N” 相比，可以实现更强的保护功能，降低电源成本。**表 1** 所示为此次开发的 FA1B00N 与传统产品的主要功能比较。

与传统产品相比，FA1B00N 添加了启动时的过冲减少功能[14]、PFC 输出电压降低抑制功能及 V_{CC} 电压的过电压保护功能。此外，还提高了 PFC 输出电压控制的基准电压 V_{fb} 的精度及过电流检测电压的精度。

通过这些功能的增加和精度的提高，可削减待机电力、提高包括轻负载在内的广泛负载区域的效率、提高可靠性并降低电源成本（参照 43 页，“第 4 代临界模式 PFC 控制 IC “FA1B00N”）。

表 1 与传统产品的性能比较

项目	FA1B00N	FA5601N
开通时机检测	ZCD* 绕组	ZCD 绕组
控制方式	导通宽度固定控制	导通宽度固定控制
启动时过冲减少功能	有	无
PFC 输出电压降低抑制功能	有	无
V_{CC} 电压过电压保护	有	无
V_{fb} 基准电压	2.5 V±1.0%	2.5 V±1.4%
过电流检测电压	0.65 V±2.0%	0.65 V±3.1%
轻负载时开关运行	最大振荡频率限制	最大振荡频率限制

★ ZCD： Zero Current Detection

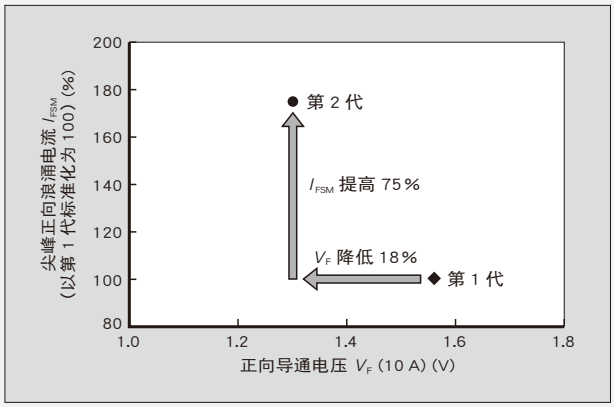

图 9 650 V 耐压 SiC-SBD 第 1 代与第 2 代的 V_F - I_{FSM} 特性

3.9 第 2 代 SiC-SBD

迄今为止，富士电机已经量产使用了 SiC 的 SBD(*8)（Schottky Barrier Diode）、平面型栅 MOSFET 和沟槽型栅 MOSFET。这些产品被应用于太阳能 PCS、产业用变频器及铁路车辆用变频器等，为节能做出了贡献。

此次，富士电机开发出了第 2 代 SiC-SBD，其特性和正向浪涌耐量优于第 1 代 SiC-SBD。

与第 1 代相比，第 2 代 SiC-SBD 通过肖特基接合的优化改善了 3% 的 V_F，通过结型势垒肖特基（JBS：Junction Barrier Schottky）结构[15]和漂移层的优化降低了漂移电阻，通过元件厚度薄化至约 1/3 降低了基板电阻。通过这些，将 V_F 降低了 18%，改善了导通损耗。

图 9 所示为 650 V 耐压 SiC-SBD 的正向导通电压 V_F- 正向浪涌耐量 I_{FSM} 特性。与第 1 代相比，第 2 代 SiC-SBD 的 V_F（10 A）降低了 18%，I_{FSM} 提高了 75%，同时实现了低损耗和高可靠性。从 2020 年度开始[16]开发采用了本 SBD 元件的分立器件产品。

3.10 1.2 kV SiC 超结 MOSFET

为降低 SiC-MOSFET 的特性导通电阻 R_{on}·A，需要降低占 MOSFET 电阻主要部分的漂移层的电阻。近年来，正在研究将 MOSFET 的寄生二极管（体二极管）用作续流二极管，体二极管的恢复特性也受到关注。

针对这些课题，富士电机着眼于可在不降低耐压的情况下有效降低漂移层电阻的 SJ 结构[17]，正在进行相关开发。

目前，已试制了 1.2 kV 耐压等级的标准 SiC-SJ-MOSFET（SiC-SJ）和 SiC 窄间距 SJ-MOSFET（SiC-narrow SJ pitch），以及用于比较的 SiC-non-SJ-MOSFET（non-SJ）。与标准 SiC-SJ 结构相比，SiC 窄间距 SJ 结构 p 柱宽度为一半，n 柱浓度比标准 SiC-SJ-MOSFET 高。将试制的 MOSFET 组装到 TO-247 封装

(*8) SBD

Schottky Barrier Diode 的简称。利用因金属和半导体的接合而产生的肖特基势垒、具有整流作用的二极管。由于电气特性优秀，已经开始研究将其应用到 SiC-SBD 的 FWD 中。和同时利用少数载流子的 PiN（P-intrinsic-N）相比，仅靠多数载流子运行的 SBD 的反向恢复速度快，反向恢复损耗小。

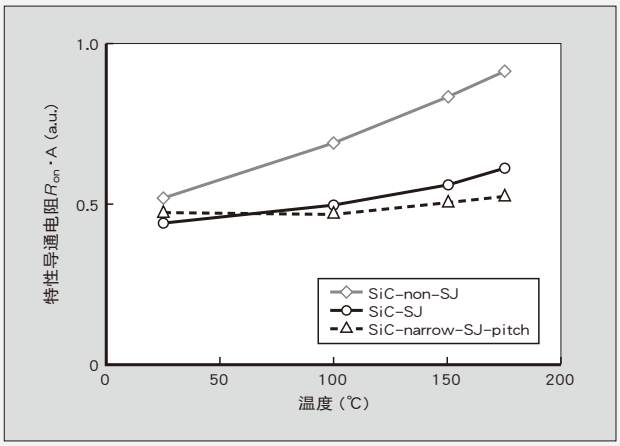

图 10　特性导通电阻的温度依赖性

中，对静态特性和体二极管的恢复特性进行了比较评价。

关于静态特性，在室温及 175 ℃下将栅极电压设定为 0 V，研究了正向 *I*–*V* 特性。**图 10** 所示为 R_{on}·*A* 的温度依赖性。标准 SiC-SJ-MOSFET 和 SiC 窄间距 SJ-MOSFET 的 R_{on}·*A* 比 SiC-non-SJ 低，其温度依赖性也低。此外，结果表明，在 175 ℃下，SiC 窄间距 SJ-MOSFET 得到了最低的 R_{on}·*A*，通过将 n 柱设为高浓度，进行窄间距化，可进一步降低 SiC-SJ-MOSFET 的电阻。通过改善其他静态特性（耐压、体二极管的 *I*–*V* 特性）和体二极管的恢复特性，有望将该技术应用于变频器电路。

本研究是作为 TSUKUBA POWER ELECTRONICS CONSTELLATIONS（TPEC）的事业而进行的（参照 49 页，“1.2 kV SiC 超结 MOSFET”）。

4　后记

本文对富士电机在功率半导体开发方面的最新成果进行了简单介绍。自创业以来，富士电机始终致力于能源技术的革新，将“通过能源、环境技术的革新，为实现安全安心、可持续发展的社会做出贡献”作为经营方针。当前，社会对节能化、低碳化、无碳化等环境问题的关注日益高涨，电力电子正是应对上述问题的关键技术。功率半导体是电力电子中的关键器件，今后，本公司会继续通过技术革新，为实现可持续发展的社会做出贡献。

参考文献

⑴ ISPSD 2003 Advanced thin wafer IGBTs with new thermal management solution.

⑵ 野口晴司等. 轻度混合动力车用 RC-IGBT. 富士电机技报. 2015, vol.C7, no.1, p.16-19.

⑶ 井上大辅等. xEV 用第 4 代铝制直接水冷封装技术. 富士电机技术期刊. 2020, vol.C12, no.1, p.29-33.

⑷ Gohara, H. et al. “Next-gen IGBT module structure for hybrid vehicle with high cooling performance and high temperature operation”. Proceedings of PCIM Europe 2014. p.1187-1194.

⑸ 中川翔ほか. ワンチップ リニア制御用 IPS「F5106H」. 富士電機技報. 2013, vol.86, no.4, p.273-276.

⑹ Kawabata, J. et al. “The New High Power Density 7th Generation IGBT Module for Compact Power Conversion Systems”. Proceeding of PCIM Europe 2015.

⑺ Takahashi, M. et al. “Extended Power Rating of 1200V IGBT Module with 7G RC-IGBT Chip Technologies”, Proceeding of PCIM Europe 2016.

⑻ Takahashi, K. et al. “1200V Class Reverse Conducting IGBT Optimized for Hard Switching Inverter”, Proceeding of PCIM Europe 2014.

⑼ Iwasaki, Y. et al. “All-SiC Module with 1st Generation Trench Gate SiC MOSFETs and New Concept Package”. PCIM Europe 2017. p.651-657.

⑽ 皆川启等. 第 7 代“X 系列”IGBT-IPM. 富士电机技术期刊. 2020, vol.C12, no.1, p.12-16.

⑾ Kawabata, J. et al. “The New High Power Density 7th Generation IGBT Module for Compact Power Conversion Systems”. Proceeding of PCIM Europe 2015.

⑿ 原幸仁等. 1200V 分立器件 IGBT“XS 系列”. 富士电机技术期刊. 2020, vol.C12, no.1, p.38-41.

⒀ Yoshida, K. et al. “Power Rating extension with 7th generation IGBT and thermal management by newly developed package technologies”. PCIM Europe 2017.

⒁ 菅原敬人等. 第 3 代临界模式 PFC 控制 IC“FA1A00 系列”. 富士电机技报. 2015, vol.C7, no.1, p.25-28.

⒂ Bjoerk, F. et al. “2nd generation 600V SiC Schottky diodes use merged pn/Schottky structure for surge overload protection”. Twenty-First Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2006. APEC '06.

⒃ 桥爪悠一等. 第 2 代 SiC-SBD. 富士电机技术期刊. 2021, vol.C13, no.1, p.58-60.

⒄ Fujihira, T. “Theory of Semiconductor Superjunction Devices”, Jpn. J. Appl. Phys., 1997, vol.36, p.6254-6262.

大西　泰彦

从事电子元件的研究开发。现为富士电机株式会社电子元件事业本部开发统括部部长。工学博士、电气学会会员。

宫坂　忠志

从事电子元件事业运营。现为富士电机株式会社电子元件事业本部电装事业部部长。电气学会会员。

井川　　修

从事电子元件事业运营。现为富士电机株式会社电子元件事业本部产业事业部部长。工学博士。电气化学会会员。

富士电机

Fuji Electric

＊本刊记载的公司名称及产品，有可能是各相关公司的商标或注册商标。